

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2000-197270
(43)Date of publication of application : 14.07.2000

(51)Int.Cl. H02J 3/18
H02J 3/00

(21)Application number : 10-372113
(22)Date of filing : 28.12.1998

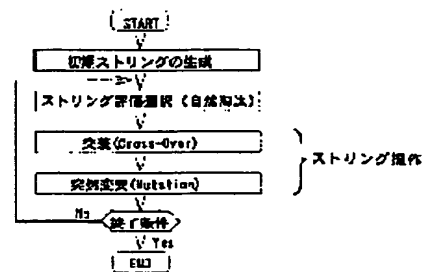
(71)Applicant : FUJI ELECTRIC CO LTD
(72)Inventor : FUKUYAMA YOSHIKAZU
KANAZAWA YASUHISA

(54) METHOD FOR DETERMINING OPTIMUM INSTALLING PLACE OF PHASE MODIFYING EQUIPMENT IN POWER DISTRIBUTING SYSTEM

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To make automatic and efficient the determining tasks of the installing places of phase modifying equipments.

SOLUTION: This method is the one for determining the optimum installing places of phase modifying equipments for the purpose of minimizing the effective power loss, and the equipment installing cost of an objective power distributing system under a variety of constrained conditions, when its configuration, the impedances of its respective appliances, its respective load capacities, its respective power supplies and the capacities thereof, and its phase modifying equipments and the installing candidate places thereof are given. The effective power loss is calculated by the three-phase unbalanced load-flow calculation using a Zbus Gauss method. Also, as the combinative optimizing method for determining the optimum installing places, a genetic algorithm(GA) is used. This GA has a string selecting step for using concurrently an elite strategy and a roulette wheel selection method. The former is the strategy for selecting a predetermined number of strings whose estimation extents range from the highest one to a predeterminedly ranked one among the strings having their lengths responding to the number of the installing candidate places. The latter is the method for multiplying each of the remaining strings other than the foregoing predetermined number of strings by using the probability obtained on a basis of its fitness.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]
[Date of sending the examiner's decision of rejection]
[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]
[Date of final disposal for application]
[Patent number]
[Date of registration]
[Number of appeal against examiner's decision of rejection]
[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]
[Date of extinction of right]

Copyright (C): 1998,2000 Japanese Patent Office

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2000-197270

(P2000-197270A)

(43) 公開日 平成12年7月14日 (2000. 7. 14)

(51) Int.Cl.⁷

H 0 2 J 3/18
3/00

識別記号

F I

H 0 2 J 3/18
3/00

テマコード^{*} (参考)

Z 5 G 0 6 6
G

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 11 頁)

(21) 出願番号 特願平10-372113

(22) 出願日 平成10年12月28日 (1998. 12. 28)

(71) 出願人 000005234

富士電機株式会社

神奈川県川崎市川崎区田辺新田1番1号

(72) 発明者 福山 良和

神奈川県川崎市川崎区田辺新田1番1号

富士電機株式会社内

(72) 発明者 金澤 康久

神奈川県川崎市川崎区田辺新田1番1号

富士電機株式会社内

(74) 代理人 100091281

弁理士 森田 雄一

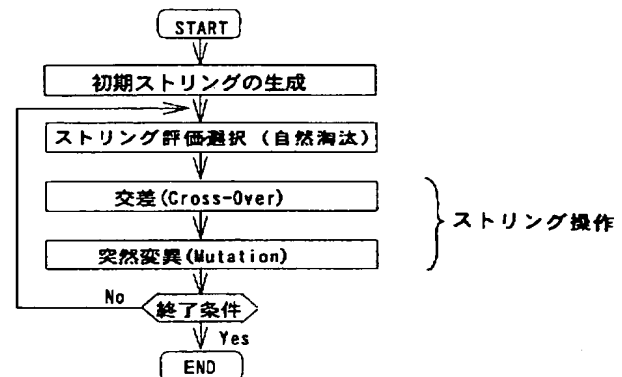
Fターム(参考) 5G066 AA01 AA03 AE01 AE05 AE09

(54) 【発明の名称】 配電系統における調相設備の最適設置箇所決定方法

(57) 【要約】

【課題】 調相設備設置箇所の決定業務の自動化、効率化を図る。

【解決手段】 配電系統の構成、各機器インピーダンス、各負荷容量、各電源及び電源容量、並びに調相設備とその設置候補箇所が与えられたときに、各種制約条件のもとで対象系統の有効電力損失及び設備設置コストを最小化することを目的として調相設備の最適設置箇所を求めるための方法である。有効電力損失を、Zbus Gauss法を用いた三相不平衡潮流計算により求める。また、最適設置箇所を決定する組合せ最適化手法として遺伝的アルゴリズム (GA) を使用する。このGAは、設置候補箇所の数に応じた長さのストリングの中で最も評価の高いものから所定数選択するエリート戦略と、残りのストリングについて各ストリングの適応度に基づく確率を用いて増殖させるRoulette Wheel Selection手法とを併用したストリング選択ステップを有する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 配電系統の構成、各機器インピーダンス、各負荷容量、各電源及び電源容量、並びに調相設備とその設置候補箇所が与えられたときに、各種制約条件のもとで対象系統の有効電力損失及び設備設置コストを最小化することを目的として調相設備の最適設置箇所を求める調相設備の最適設置箇所決定方法において、前記有効電力損失を、Zbus Gauss法を用いた三相不平衡潮流計算により求めるとともに、前記最適設置箇所を決定する組合せ最適化手法として遺伝的アルゴリズムを使用し、この遺伝的アルゴリズムは、設置候補箇所の数に応じた長さのストリングの中で最も評価の高いものから所定数選択するエリート戦略と、残りのストリングについて各ストリングの適応度に基づく確率を用いて増殖させるRoulette Wheel Selection手法とを併用したストリング選択ステップを有することを特徴とする配電系統における調相設備の最適設置箇所決定方法。

【請求項2】 配電系統の構成、各機器インピーダンス、各負荷容量、各電源及び電源容量、並びに調相設備とその設置候補箇所が与えられたときに、各種制約条件のもとで対象系統の有効電力損失及び設備設置コストを最小化することを目的として調相設備の最適設置箇所を求める調相設備の最適設置箇所決定方法において、前記有効電力損失を、Zbus Gauss法を用いた三相不平衡潮流計算により求めるとともに、前記最適設置箇所を決定する組合せ最適化手法として遺伝的アルゴリズムを使用し、この遺伝的アルゴリズムは、設置候補箇所の数に応じた長さのストリングの中で最も評価の高いものから所定数選択するエリート戦略と、残りのストリングについて各ストリングの適応度に基づく確率を用いて増殖させ、更に前記確率に基づく期待値に応じて増殖させるRemainder Stochastic Sampling with out Replacement手法とを併用したストリング選択ステップを有することを特徴とする配電系統における調相設備の最適設置箇所決定方法。

【請求項3】 配電系統の構成、各機器インピーダンス、各負荷容量、各電源及び電源容量、並びに調相設備とその設置候補箇所が与えられたときに、各種制約条件のもとで対象系統の有効電力損失及び設備設置コストを最小化することを目的として調相設備の最適設置箇所を求める調相設備の最適設置箇所決定方法において、前記有効電力損失を、Zbus Gauss法を用いた三相不平衡潮流計算により求めるとともに、前記最適設置箇所を決定する組合せ最適化手法として遺伝的アルゴリズムを使用し、この遺伝的アルゴリズムは、設置候補箇所の数に応じた長さのストリングの中で最も

評価の高いものから所定数選択するエリート戦略と、残りのストリングについて各ストリングの適応度に基づく確率を用いて増殖させ、更に前記確率に基づく期待値に応じて増殖させるRemainder Stochastic Sampling with Replacement手法とを併用したストリング選択ステップを有することを特徴とする配電系統における調相設備の最適設置箇所決定方法。

【請求項4】 配電系統の構成、各機器インピーダンス、各負荷容量、各電源及び電源容量、並びに調相設備とその設置候補箇所が与えられたときに、各種制約条件のもとで対象系統の有効電力損失及び設備設置コストを最小化することを目的として調相設備の最適設置箇所を求める調相設備の最適設置箇所決定方法において、前記有効電力損失を、Zbus Gauss法を用いた三相不平衡潮流計算により求めるとともに、前記最適設置箇所を決定する組合せ最適化手法としてシミュレーテッドアニーリングを使用し、このシミュレーテッドアニーリングは、

設置箇所に関する初期状態をランダムに生成し、所定のクーリングスケジュールのもとで、前記初期状態から設置候補箇所をランダムに変更することにより現在とは異なる設置候補箇所を隣接状態として順次生成し、これらの隣接状態を対象として目的関数を用いた状態評価により最適解としての設置箇所を決定することを特徴とする配電系統における調相設備の最適設置箇所決定方法。

【請求項5】 配電系統の構成、各機器インピーダンス、各負荷容量、各電源及び電源容量、並びに調相設備とその設置候補箇所が与えられたときに、各種制約条件のもとで対象系統の有効電力損失及び設備設置コストを最小化することを目的として調相設備の最適設置箇所を求める調相設備の最適設置箇所決定方法において、前記有効電力損失を、Zbus Gauss法を用いた三相不平衡潮流計算により求めるとともに、前記最適設置箇所を決定する組合せ最適化手法としてタブーサーチを使用し、このタブーサーチは、設置箇所に関する初期状態をランダムに生成し、前記初期状態から設置候補箇所をランダムに変更することにより現在とは異なる設置候補箇所を隣接状態として順次生成し、これらの隣接状態のうちタブーリストにないものを対象として目的関数を用いた状態評価により最適解としての設置箇所を決定することを特徴とする配電系統における調相設備の最適設置箇所決定方法。

【請求項6】 配電系統の構成、各機器インピーダンス、各負荷容量、各電源及び電源容量、並びに調相設備とその設置候補箇所が与えられたときに、各種制約条件のもとで対象系統の有効電力損失及び設備設置コストを最小化することを目的として調相設備の最適設置箇所を求める調相設備の最適設置箇所決定方法において、前記有効電力損失を、Zbus Gauss法を用いた三相不平衡潮流計算により求めるとともに、

前記最適設置箇所を決定する組合せ最適化手法としてリアクティブタブーサーチを使用し、このリアクティブタブーサーチは、

設置箇所に関する初期状態をランダムに生成し、前記初期状態から設置候補箇所をランダムに変更することにより現在とは異なる設置候補箇所を隣接状態として順次生成し、これらの隣接状態のうちタブーリストにないものを対象として目的関数を用いた状態評価により最適解としての設置箇所を決定するとともに、解の探索結果に応じてタブーリストの長さを調整可能としたことを特徴とする配電系統における調相設備の最適設置箇所決定方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、配電系統において電力用コンデンサ等の調相設備を設置するに際し、三相不平衡潮流計算方法及び種々の組合せ最適化手法を用いて有効電力損失及び設備設置コストを最小化するような設置箇所を決定する、調相設備の最適設置箇所決定方法に関するものである。

【0002】

【従来の技術及び発明が解決しようとする課題】従来、配電系統において調相設備を設置する場合には、候補となる設置箇所に対して有効電力損失等につき単相回路計算または単相潮流計算を行い、その中から最適な設置箇所を人為的に決定するのが一般的である。しかるに、配電系統は通常、各相に対する単相負荷が大半を占めるため、基本的に不平衡になっている。従って、三相不平衡計算を行う必要がある。一方、家電機器や汎用品へのインバータの普及により、配電系統における負荷特性は定電力となりつつある。定電力負荷特性は、従来の計算では考慮することが不可能であり、潮流計算の導入が必要である。更に従来では、系統内の様々な設置候補箇所に関する計算のみが自動化されており、その中から最適な設置箇所を決定する意思決定は人間に委ねられていた。従って、業務の効率化を図るためには、この意思決定の自動化が必要であった。

【0003】そこで本発明は、対象系統の有効電力損失等の計算にZbus Gauss法を用いた三相不平衡潮流計算を適用し、かつ、意思決定の自動化に遺伝的アルゴリズムやシミュレーテッドアニーリング、タブーサーチ等の組合せ最適化手法を用いて業務の自動化、効率化を可能にした配電系統における調相設備の最適設置箇所決定方法を提供しようとするものである。

【0004】

【課題を解決するための手段】上記課題を解決するため、請求項1記載の発明は、配電系統の構成、各機器インピーダンス、各負荷容量、各電源及び電源容量、並びに調相設備とその設置候補箇所が与えられたときに、各種制約条件のもとで対象系統の有効電力損失及び設備設

置コストを最小化することを目的として調相設備の最適設置箇所を求める調相設備の最適設置箇所決定方法において、前記有効電力損失を、Zbus Gauss法を用いた三相不平衡潮流計算により求めるとともに、前記最適設置箇所を決定する組合せ最適化手法として遺伝的アルゴリズムを使用し、この遺伝的アルゴリズムは、設置候補箇所の数に応じた長さのストリングの中で最も評価の高いものから所定数選択するエリート戦略と、残りのストリングについて各ストリングの適応度に基づく確率を用いて増殖させるRoulette Wheel Selection手法とを併用したストリング選択ステップを有するものである。

【0005】請求項2記載の発明は、前記有効電力損失を、Zbus Gauss法を用いた三相不平衡潮流計算により求めるとともに、前記最適設置箇所を決定する組合せ最適化手法として遺伝的アルゴリズムを使用し、この遺伝的アルゴリズムは、設置候補箇所の数に応じた長さのストリングの中で最も評価の高いものから所定数選択するエリート戦略と、残りのストリングについて各ストリングの適応度に基づく確率を用いて増殖させ、更に前記確率に基づく期待値に応じて増殖させるRemainderStochastic Sampling without Replacement手法とを併用したストリング選択ステップを有するものである。

【0006】請求項3記載の発明は、前記有効電力損失を、Zbus Gauss法を用いた三相不平衡潮流計算により求めるとともに、前記最適設置箇所を決定する組合せ最適化手法として遺伝的アルゴリズムを使用し、この遺伝的アルゴリズムは、設置候補箇所の数に応じた長さのストリングの中で最も評価の高いものから所定数選択するエリート戦略と、残りのストリングについて各ストリングの適応度に基づく確率を用いて増殖させ、更に前記確率に基づく期待値に応じて増殖させるRemainderStochastic Sampling with Replacement手法とを併用したストリング選択ステップを有するものである。

【0007】請求項4記載の発明は、前記有効電力損失を、Zbus Gauss法を用いた三相不平衡潮流計算により求めるとともに、前記最適設置箇所を決定する組合せ最適化手法としてシミュレーテッドアニーリングを使用し、このシミュレーテッドアニーリングは、設置箇所に関する初期状態をランダムに生成し、所定のクーリングスケジュールのもとで、前記初期状態から設置候補箇所をランダムに変更することにより現在とは異なる設置候補箇所を隣接状態として順次生成し、これらの隣接状態を対象として目的関数を用いた状態評価により最適解としての設置箇所を決定するものである。

【0008】請求項5記載の発明は、前記有効電力損失を、Zbus Gauss法を用いた三相不平衡潮流計算により求めるとともに、前記最適設置箇所を決定する組合せ最適化手法としてタブーサーチを使用し、このタブーサーチは、設置箇所に関する初期状態をランダムに生成し、前記初期状態から設置候補箇所をランダムに変更すること

により現在とは異なる設置候補箇所を隣接状態として順次生成し、これらの隣接状態のうちタブーリストにないものを対象として目的関数を用いた状態評価により最適解としての設置箇所を決定するものである。

【0009】請求項6記載の発明は、前記有効電力損失を、Zbus Gauss法を用いた三相不平衡潮流計算により求めるとともに、前記最適設置箇所を決定する組合せ最適化手法としてリアクティブタブーサーチを使用し、このリアクティブタブーサーチは、設置箇所に関する初期状態をランダムに生成し、前記初期状態から設置候補箇所をランダムに変更することにより現在とは異なる設置候補箇所を隣接状態として順次生成し、これらの隣接状態のうちタブーリストにないものを対象として目的関数を用いた状態評価により最適解としての設置箇所を決定するとともに、解の探索結果に応じてタブーリストの長さを調整可能としたものである。

【0010】

【発明の実施の形態】以下、図に沿って本発明の実施形態を説明する。はじめに、請求項1に記載した発明の実施形態を述べる。

1. ネットワーク表現

まず、図1はこの実施形態で使用するネットワークモデルの説明図であり、配電線10及び区分開閉器(VS・AS)30をブランチとし、各負荷(電力用コンデンサSCを含む)20をノードとした系統表現になっている。図1のモデルにおいて、分岐線がある場合には分岐点も含め、配電線の各開閉器端に負荷を集中負荷として配置する。

【0011】2. 次に、調相設備の最適設置箇所を決定する調相設備設置計画の定式化について述べる。

(1) 最適化問題としての定式化

ここでは、以下の仮定を設ける。

- a. 調相設備単体の容量は、複数の標準固定容量の中から決定する。
- b. 設置候補箇所は事前に指定する。
- c. 系統構成(開閉器の入切状態)及び負荷状態は事前に指定する。

【0012】以上のような仮定を用いると、調相設備設置計画は以下のような組合せ最適化問題として定式化することができる。

【目的関数】数式1の目的関数 f_c に示すように、対象系統の有効電力損失(送電損失)の総和及び調相設備設置コストの最小化(両者の和の最小化)を目的とする。なお、数式1において、 n はブランチ数、 $Loss_i$ ：ブランチ*i*における有効電力損失分、 $Cost$ ：調相設

備設置コスト、 w_i ：重み係数である。

【0013】

【数1】

$$f_c = \min (w_1 \sum_{i=1}^n Loss_i + w_2 Cost)$$

【0014】(制約条件)

a. 電圧制約

数式2に示すように、各ノードの電圧は規定値以内でなくてはならない。なお、数式2において、 V_i ：ノード*i*の電圧、 V_{min} ：ノードの許容最低電圧、 V_{max} ：ノードの許容最大電圧である。

【0015】

【数2】 $V_{min} \leq V_i \leq V_{max}$

【0016】b. 配電線・開閉器容量制約

数式3に示すように、各配電線・開閉器の通過電流は、許容値以内でなくてはならない。なお、数式3において、 I_i ：ブランチ*i*の通過電流、 I_{max} ：ブランチの許容最大電流である。

【0017】

【数3】 $I_i \leq I_{max}$

【0018】(2) 回路状態及び送電損失の計算方法(三相不平衡潮流計算)

上記目的関数にある対象系統の損失値及び制約条件にある各ノード電圧、配電線・開閉器通過容量は、三相不平衡潮流計算により計算した結果を用いてチェックする。三相不平衡潮流計算の収束計算は、Zbus Gauss法を用いる。Zbus Gauss法では、Gauss-Seidel法を用いた収束計算を行う。なお、負荷としては、定インピーダンス負荷、定電力負荷、定電流負荷及びこれらの混合負荷を扱うものとする。

【0019】以下、Zbus Gauss法について説明する。まず、配電系統の各ノードにおける有効電力 P 及び無効電力 Q を指定値に置き換えたとき、各ノード*i*における潮流方程式は数式4のようになる。

【0020】

【数4】

$$P_i + jQ_i = \sum_j V_i (Y_{ij} V_j)^*$$

【0021】従って、指定値を考慮して、各相について以下の数式5、数式6が成り立つ。

【0022】

【数5】

$$\begin{bmatrix} P_{Ai} \\ P_{Bi} \\ P_{Ci} \end{bmatrix} - \operatorname{Re} \left\{ \sum_j \begin{bmatrix} V_{Ai} & V_{Bi} & V_{Ci} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{AA} & Y_{AB} & Y_{AC} \\ Y_{BA} & Y_{BB} & Y_{BC} \\ Y_{CA} & Y_{CB} & Y_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Aj} \\ V_{Bj} \\ V_{Cj} \end{bmatrix} \right\} = 0$$

【0023】

【数6】

$$\begin{bmatrix} Q_{Ai} \\ Q_{Bi} \\ Q_{Ci} \end{bmatrix} - \operatorname{Im} \left[\sum_j^n [V_{Ai} \ V_{Bi} \ V_{Ci}] \begin{bmatrix} Y_{AA} & Y_{AB} & Y_{AC} \\ Y_{BA} & Y_{BB} & Y_{BC} \\ Y_{CA} & Y_{CB} & Y_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Aj} \\ V_{Bj} \\ V_{Cj} \end{bmatrix} \right] = 0$$

【0024】なお、数式5、数式6において、

P_{Ai} , P_{Bi} , P_{Ci} : ノード i における有効電力 (指定値)

Q_{Ai} , Q_{Bi} , Q_{Ci} : ノード i における無効電力 (指定値)

V_{Ai} , V_{Bi} , V_{Ci} : ノード i における電圧ベクトル [大きさ、位相] (未知数)

である。数式5及び数式6は一般には非線形方程式といふことができ、これに対して収束計算を行って三相不平衡潮流計算を行う。数式5及び数式6は、以下のようにコンパクトに表現することができる。

【0025】

【数7】 $f(x) = 0$

【0026】Zbus Gauss法は、インピーダンス行列を用いて、非線形方程式の一般的な反復解法であるGauss-Seidel法により、数式7を解く方法である。いま、 n 個の変数 x_1, x_2, \dots, x_n に関する n 個の方程式が数式8の形で与えられたとする。

【0027】

【数8】 $x_1 = g_1(x_1, x_2, \dots, x_n),$
 $x_2 = g_2(x_1, x_2, \dots, x_n),$
 $\dots\dots\dots,$
 $x_n = g_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$

【0028】このとき、次のような反復法でこの方程式を解くことができる。いま、第 k 回目の反復計算における x_1, x_2, \dots, x_n の値を $x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}$ とし、第 $(k+1)$ 回目の値を数式9のように計算する。

【0029】

【数9】 $x_1^{k+1} = g_1(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}),$
 $x_2^{k+1} = g_2(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}),$
 $\dots\dots\dots,$
 $x_n^{k+1} = g_n(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})$

【0030】この方法を順次繰り返していけば、適当な条件の下で $x^{(n)}$ が真値に収束する。これが基本的な反復法であるが、Gauss-Seidel法では、 $x_i^{(n+1)}$ を計算したら、直ちにこれを第 $(i+1)$ 式以降に代入して $x_{i+1}^{(n+1)}$ 以降を計算する。つまり、一番新しい計算値を直ちに用いる方法である。この場合の計算式は、数式10のように記述することができる。

【0031】

【数10】 $x_1^{k+1} = g_1(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}),$
 $x_2^{k+1} = g_2(x_1^{k+1}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}),$
 $\dots\dots\dots,$
 $x_n^{k+1} = g_n(x_1^{k+1}, x_2^{k+1}, \dots, x_n^{(k)})$

【0032】上記反復法を潮流方程式に適用するために

は、以下のようにする。まず、数式4は数式11のようにも記述できる。

【0033】

【数11】 $P_i + j Q_i = V_i I_i^*$

【0034】従って、電流は以下の数式12によって記述することができる。

【0035】

【数12】 $I_i = (P_i + j Q_i) / V_i^*$

【0036】母線電圧の初期値を設定することにより、数式12から電流を計算することができる。また、電圧の新しい推定値は、数式13から求められる。なお、数式13において、 Z はインピーダンス行列である。

【0037】

【数13】 $V_i^{\text{new}} = Z I_i$

【0038】数式12、数式13から、以下の数式14に示すように数式9に相当する反復式を得ることができる。

【0039】

【数14】 $V_i^{k+1} = Z \{ (P_i + j Q_i) / V_i^{(k)*} \}$

【0040】上記に反復法を適用することにより、潮流方程式を解くことができる。この方法は、放射状となる配電系統において収束特性が優れているものとして知られている (T. H. Chen, Mo-Shing Chen, et al., "Distribution System Power Flow Analysis - A Rigid Approach", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 6, No. 3, July 1991. 等を参照)。

【0041】3. 次に、最適な設置箇所を求める意思決定を自動化するため、遺伝的アルゴリズム (GA) による定式化を行う。

(1) スtring表現方法

調相設備の設置候補箇所の数に応じたString長とし、各String位置は、標準容量の中のどれを設置するかを十進数で指定する。設置しない場合は0を指定する。String位置における数値とその意味を図2に示す。

【0042】(2) 初期Stringの生成方法

各Stringはランダムに生成する。つまり、各String位置ごとにランダムにString位置の値を発生させる。

【0043】(3) Stringの評価・選択 (自然淘汰)

1) String評価

Stringの評価は、目的関数 f_c を用いた数式15の評価関数 (適応度関数) を使用する。

【0044】

【数15】 $f = 1 / f_c$

【0045】2) 評価関数の修正

目的関数 f_c を計算する際に、制約を満たさないストリングが生成されている場合がある。この場合、ストリング操作に戻って、もう一度ストリング操作を繰り返し、違反がなくなるまで乱数を変更して操作を繰り返すことが最善であるが、ここでは計算時間削減に留意し、違反のあるストリングについては評価関数 f を修正して対応することとする。これにより、1回のストリング操作のみが行われることになり、計算時間の短縮が可能になる。具体的には、その時点の評価関数の最大値 f_{\max} 及び最小値 f_{\min} を用いて、以下の数式16により評価関数 f を修正して f' とする。

【0046】

$$\text{【数16】 } f' = f_{\max} - (f_{\max} - f) \times f_{\max} / (f_{\max} - f_{\min})$$

【0047】3) 評価関数値の保存と利用

様々な設置候補箇所に対して計算を行った三相不平衡潮流計算値は、設置候補箇所をキーとしてハッシュ関数を用いて保存しておき、取り出すようにする。従って、評価関数の計算を行う場合には、先ず、それまでに計算されていないかどうかをチェックし、計算が行われていない場合のみ三相不平衡潮流計算を実施する。

【0048】4) スケーリング

シミュレーションの初期段階においては、ある特定のストリングが優勢になりすぎる場合がある。このような場合には、適応度に応じた増殖により、このストリングが集団において加速度的に支配的になってしまう。GAによる最適化において重要な特性は、ストリング集団のばらつきである。ここでは、数式17に示すリニア・スケーリングにより適応度を修正し、集団のばらつきを保つこととした。

【0049】

$$\text{【数17】 } f'' = \alpha f' + \beta$$

【0050】数式17において、 f'' : スケーリングされた適応度、 f' : 修正後の適応度、 α 、 β : 係数である。ここで、係数 α 、 β は、修正後の適応度とスケーリングされた適応度との平均が等しくなり、かつ、スケーリングされた適応度の最大値が適応度の平均値のある特定の倍数 (γ) になるように決定する。

【0051】5) ストリング選択

ストリング選択には、エリート戦略とRoulette Wheel Selection (RWS) という手法を用いる。エリート戦略としては、現在のストリングのうち、最も評価の高いものからパラメータとして与えた割合だけのストリングをそのまま選択する。残りのストリングについては、以下の手順からなるRWSを用いる。

- ・各ストリングの適応度を足し込む ($\sum f_i$)。
- ・各ストリングの適応度 (f_i) の割合により求めた数式18の確率を用いて各ストリングを増殖する。

【0052】

$$\text{【数18】 } P_{\text{select } i} = f_i / (\sum f_i)$$

【0053】(4) ストリング操作

1) 交差

本実施形態では、多点交差を用いた交差とする。交差数は、事前にパラメータとして与える。

2) 突然変異

突然変異は、各ストリング位置について、現在の値と異なる値をランダムに発生させることとする。

以上により、GAによる定式化処理の概略フローは図3のようになる。

【0054】次に、請求項2に記載した発明の実施形態を説明する。この実施形態が請求項1の発明の実施形態と異なるのは、ストリング選択の手法のみであるため、以下ではこの部分を中心に説明する。本実施形態では、ストリング選択にエリート戦略とRemainder Stochastic Sampling without Replacement (RWOR) という手法を用いる。この手法では、前述した数式18により確率 $P_{\text{select } i}$ を求めた後、以下の数式19により各ストリングの期待値 e_i を計算する。なお、数式19において、 ns はエリート戦略以外で選択するストリング数である。

【0055】

$$\text{【数19】 } e_i = P_{\text{select } i} \times ns$$

【0056】期待値 e_i の整数項により、各々のストリングを増殖させる。これだけでは規定のストリング数 ns だけの増殖に不足するため、分数項を用いて以下の処理を行う。すなわち、 e_i の分数部を重み付けされたコイントス (ベルヌーイ試行) における確率として使用する。例えば、 $e_i = 2.4$ のストリングは、2つは整数部により既に増殖されているが、0.4の確率で更にもう一つを増殖する。この処理を、各ストリングに対して行い、全ストリング数が ns となるまで行う。

【0057】次いで、請求項3に記載した発明の実施形態を説明する。この実施形態についても、請求項1及び請求項2の発明の実施形態と異なるのは、ストリング選択の手法のみである。本実施形態では、ストリング選択にエリート戦略とRemainder Stochastic Sampling with Replacement (RWR) という手法を用いる。

【0058】この手法でも、前述した数式19により求めた各ストリングの期待値 e_i の整数項により、各々のストリングを増殖させるが、 e_i の分数部は、Roulette Wheel Selection (RWR) における重みを計算するために使用され、エリート戦略以外で選択するストリング数 ns に満たない数だけストリングを増殖する。つまり、 e_i の分数部にのみRWSを適用する。

【0059】次に、請求項4に記載した発明の実施形態を説明する。この実施形態では、設置候補箇所の組合せから最適な設置箇所を求める意思決定の自動化に、シミュレーテッドアニーリング (SA) を利用することとした。周知のように、SAは、物理的な焼き鈍し現象を計

算機により模擬する方法に基づいている。物質の様な規則正しい結晶は、高温により一旦、溶融状態にしてゆっくりと冷却して行くと得ることができる。冷却が十分にゆっくりでないと規則正しい結晶を得ることができず、構造をもったパターンの結晶になってしまう。この現象の特徴は、物理的なエネルギーの最小値を与える状態が規則正しい結晶に対応するが、エネルギーの極小値を与える状態では規則正しい結晶にはならないことである。焼き鈍しとは、温度というゆらぎを系に与えることにより、エネルギーの極小値に捕われることなく大域的な最小値を得るための物理的手段であるといえることができる。

【0060】SAのアルゴリズムは、以下のステップからなる。

1) エネルギー E_i を持つ現在の金属状態（初期状態） S_i に摂動（例えば、分子の再配置等の小さな歪み）を加え、次の状態（隣接状態） N_j を得る。

2) もし、 $E_i \geq E_j$ （ E_j は状態 N_j におけるエネルギー）の場合には、次の状態を N_j とする。また、 $E_i < E_j$ ならば、以下の確率で次の状態を N_j とする。

$$\exp \{ (E_i - E_j) / k_B T \}$$

ここで、 T は金属の温床の温度、 k_B はボルツマン定数である。なお、このルールは、Metropolis Criterionと呼ばれている。

$$P_c \{ \text{accept } j \} = 1$$

$$P_c \{ \text{accept } j \} = \exp \{ (f(i) - f(j)) / c \}$$

【0064】数式20において、 c は制御パラメータであって温度の役割をなし、繰り返しの中で徐々に減少させる。アルゴリズムは、状態の生成と評価との繰り返しになる。 k 回目の繰り返しにおける制御パラメータの値を c_k 、状態遷移の数を L_k とすると、SAの概略的なア

```
procedure SIMULATED ANNEALING;
begin
```

```
  INITIALIZE (istart, co, L0);
```

```
  k:=0;
```

```
  i:=istart;
```

```
  repeat
```

```
    for l:=1 to Lk do
```

```
      begin
```

```
        GENERATE (Nj from Si)
```

```
        if f(j) ≤ f(i) then Si:=Nj
```

```
        else
```

```
          if exp { (f(i) - f(j)) / c_k } > random[0, 1] then Si:=Nj
```

```
        end;
```

```
      k:=k+1
```

```
    CALCULATION LENGTH (Lk);
```

```
    CALCULATION CONTROL (c_k);
```

```
  until stopcriterion
```

```
end;
```

3) 温度 T を一定のルール（クーリングスケジュール）に従って下げる。

4) 終了条件を満たしたら終了する。そうでない場合は、1)～3)を繰り返す。

【0061】このような物理現象に限らずともこのアナロジーを利用すると、数学的問題である組合せ最適化問題へのアプローチも可能なはずである。つまり、SA法は、このメトロポリス・アルゴリズムを利用した、多数の極小値（極大値）を持った非線形関数の最小値（最大値）を求めるための確率的な山登り法である。このSA法によれば、適当なクーリングスケジュール（温度 T の制御方法）を用いることにより、大域最適解が必ず得られることが数学的に証明されている。

【0062】以上のようにSA法は、メトロポリス・アルゴリズムを最適化問題の求解過程に用いたものである。このため、次の等価性に基づく物理的な多くの分子システムと最適化問題のアナロジーを仮定する。

・最適化問題の解は、物理システムの状態に等しい。

・解のコストは、状態のエネルギーに等しい。

コスト $f(i)$ 、 $f(j)$ を持つ二つの状態を S_i 、 S_j とする。 S_j が S_i の次の状態として認められるかどうかは、以下の数式20の評価確率による。

【0063】

【数20】

$$\text{if } f(j) \leq f(i)$$

$$\text{if } f(j) > f(i)$$

ルゴリズムは以下のように表される。なお、状態 S_i から次の状態（近傍） N_j を生成する方法としては、一般に高速に計算可能な簡単な処理を用いる。

【0065】

【0066】次に、制御パラメータについて述べる。始めは、すべての遷移が十分に許容される必要がある。従って、実用的には、 c_0 は十分に小さい正の値とする。また、制御パラメータの減少（クーリングスケジュール）には、数式21のような関数（定率スケジュール）が良く使用される。この数式21において、 α は1に近いが1より小さい係数（温度を下げるための係数）であり、典型的には0.8から0.99の値が用いられる。

【0067】

【数21】 $c_{k+1} = \alpha \cdot c_k$ ($k=1, 2, \dots$)

【0068】図4は、SAによる解空間の探索の概念図である。SAでは、温度によるゆらぎにより目的関数が大きくなる方向への探索も可能にしている。これにより、局所解からの脱出が可能になる。また、SAは時間を無限にかければ必ず大域最適解が得られることが数学的に保証されている。しかし、現実的には無限時間をかけるのは不可能であるため、ある時間内に得られた最良

$$f_c = \min (w_1 \sum_{i=1}^n \text{Loss}_i + w_2 \text{Cost} + w_3 \text{ConstV}_{i0})$$

【0071】次に、SAによる定式化について説明する。

(1) 状態表現方法

設置候補箇所の数の配列長とし、各配列位置は、標準容量の中のどれを設置するかを十進法で指定する。設置しない場合は、0を指定する。配列位置の数値とその意味との対応関係は、前述の図2と同様である。

【0072】(2) 初期状態の生成方法

初期状態はランダムに生成する。つまり、各配列位置ごとにランダムに配列位置の数値を発生させる。

【0073】(3) 状態の評価

各状態の評価は、目的関数値による。様々な設置候補箇所に対して計算を行った三相不平衡潮流計算値は、設置候補箇所をキーとしてハッシュ関数を用いて保存しておき、取り出すようにする。従って、評価関数の計算を行う場合には、まず、それまでに計算されていないかどうかをチェックし、計算が行われていない場合のみ三相不平衡潮流計算を実施する。

【0074】(4) 隣接状態の生成

一つの設置候補箇所をランダムに選択し、現在の値と異なる値をランダムに発生する。

【0075】以上のことから、概略の処理は以下のようになる。

- 1 初期化
- 11 パラメータの入力
- 12 対象システムデータの入力
- 13 初期設置候補解の生成
- 14 パラメータ初期値設定 ($T_k = T_0$: 初期温度)
- 2 SAの実行
- 21 現在の設置候補解 (S_i) のランダムに選択した設

解を最適解と考えることになる。

【0069】本実施形態は、上述したSAを用いて、調相設備の最適設置箇所を求める意思決定を自動化するものである。ここで、組合せ最適化問題として定式化される調相設備設置計画においては、目的関数を以下のように規定する。

【目的関数】数式22に示すように、対象システムの有効電力損失（送電損失）の総和、調相設備設置コストおよび制約違反量（これらの和）の最小化を目的とする。なお、数式22において、 n はブランチ数、 Loss_i : ブランチ*i*における有効電力損失分、 ConstV_{i0} : 制約違反量、 w_i : 重み係数である。また、制約条件については、請求項1の発明の実施形態と同様である。

【0070】

【数22】

置箇所について、現在の値と異なる値をランダムに発生させる。この解が制約を満たさない場合は、別の値を発生させる。すべての値が制約を満たさない場合には設置箇所を変えて隣接状態を生成する (S_j)。

22 もし、 $f(j) \leq f(i)$ ならば、 $S_i = S_j$

$f(j) > f(i)$ ならば $\exp\{(f(i) - f(j)) / T_k\} > \text{random}\{0, 1\}$ だったら、 $S_i = S_j$

23 終了条件チェック

終了でなかったら、

231 $T_{k+1} = \alpha T_k$ (α : 前述した温度を下げるための係数)

232 $k = k + 1$

233 前記21へ。

【0076】次に、請求項5に記載した発明の実施形態を説明する。この実施形態では、設置候補箇所の組合せから最適な設置箇所を求める意思決定の自動化に、タブーサーチを利用することとした。タブーサーチ（タブー探索法）は、Prof. Glover等によって開発されたモダンヒューリスティック手法であり、解空間を効率的に探索できる方法として注目されている。すなわち、局所探索法等では、探索の過程で同一の解が繰り返し現れる場合があり、このような同一解の再探索は探索効率の低下につながる。

【0077】そこで、過去の探索過程で求められた解や探索の移動パターンを一種の集合であるタブーリストに記憶しておき、このタブーリストに含まれない解の中から最良のものを選択するというタブーサーチ (TS) が用いられてきている。なお、タブーリストは一定の大きさを有し、その内容は最新情報によって逐次更新される。

【0078】具体的な探索法は、例えば次のとおりである。

(手順A) まず、初期解(本実施形態における初期状態に相当する)を選ぶ。

(手順B) 次に、現在の解の近傍において、前記初期解を除く最適解(本実施形態における隣接状態に相当する)を見つけ、この解により初期解を置き換える。

(手順C) 更に、タブーリストに前回の解(初期解)と、必要に応じて初期解から次の最適解への移動パターンを格納する。

上記手順A～Cの繰り返しにより、現在の解から近傍の最適解が求まるたびに現在の解や移動パターン等をタブーリストに格納していき、タブーリスト内の情報量が所定値を越えた場合にはもっとも古い情報を除去していく。そして、終了条件が満たされるまで、手順B以後の処理を繰り返す。

【0079】以下、この実施形態におけるTSによる定式化について述べる。

(1) タブーリストの表現方法

1) 状態空間の表現方法

調相設備の設置候補箇所の数の配列長とし、各配列位置は、標準容量の中のどれを設置するかを十進法で指定する。設置しない場合は、0を指定する。配列位置の数値とその意味との対応関係は、前述の図2と同様である。

【0080】2) タブーリストの形式

TSでは、以前に探索を行ったR個がタブーとなる。タブーリストの内容を以下に示す。

①調相設備の設置箇所を示す状態空間配列内容(設置状態)

②何回目の探索でタブーとなったかを示す探索回数

③評価値

このタブーリストの概念の一例を図5に示す。

【0081】3) タブーリストの格納方法

TSは、探索のたびにタブーリストの参照・格納が行われる。この参照・格納の高速化のためにハッシングを用いる。調相設備の各設置状態により、ハッシュ関数にてBucket Array上の配列位置を導出し、この位置にタブーリストを格納する。

【0082】(2) 初期状態の生成方法

調相設備の初期の設置状態はランダムに生成する。つまり、各配列位置ごとにランダムに配列位置の値を発生させる。

【0083】(3) 状態の評価

各状態の評価は、目的関数値による。様々な設置候補箇所に対して計算を行った三相不平衡潮流計算値は、設置候補箇所をキーとしてハッシュ関数を用いて保存しておき、取り出すようにする。従って、評価関数の計算を行う場合には、先ず、それまでに計算されていないかどうかをチェックし、計算が行われていない場合のみ三相不平衡潮流計算を実施する。

【0084】(4) 隣接状態の生成

各設置候補箇所に対し、現在の値と異なる値をランダムに発生する。

【0085】(5) 次状態の選択

次の状態は、隣接状態の中でタブー状態ではなく、しかも一番評価が高いものとする。以上のことから、概略の処理は図6のようになる。

【0086】次いで、請求項6に記載した発明の実施形態を説明する。この実施形態では、設置候補箇所の組合せから最適な設置箇所を求める意思決定の自動化に、リアクティブタブーサーチ(RTS)を利用する。RTSによる定式化において、(1)タブーリストの表現方法から(5)次状態の選択まではTSの場合と同様である。

【0087】異なるのは、図7に示すように、次状態の選択ステップ以降に(6)リアクションおよび(7)エスケープのステップを有する点である。以下、これらに付き説明する。

【0088】(6) リアクション

以下のような方法により、タブーリストの長さを自動調整する。

a. すべての探索済みの解は保存しておく。

b. 探索点が移動したときに、新しい探索点が以前に探索された解であった場合には、リスト長を長くする。もし、十分に長い間、以前に探索された解が出現しなかった場合には、リスト長を短くする。

【0089】(7) エスケープ

すべての探索済みの保存された解を検索し、事前に与えた値以上に、同じ解が出現した場合には、事前に与えた回数分だけランダム探索を繰り返す。

【0090】なお、図8に示す配電システムをモデルにして、各実施形態につきシミュレーションを行った。図8において、FCBは配電線(フィーダ)遮断器である。各配電線のインピーダンスは一定とし、負荷値も一定とする。この系統において、各負荷点に調相設備として電力用コンデンサを設置するかどうかを決定するものとする。従って、48箇所の候補から、最適な設置場所を決定する問題となる。各実施形態により三相不平衡潮流計算を繰り返し実行した結果、末端の負荷点4箇所に電力用コンデンサを設置すればよいという最適解を得ることができた。

【0091】

【発明の効果】以上のように本発明によれば、三相不平衡潮流計算と遺伝的アルゴリズムやシミュレーテッドアニーリング、タブーサーチ等の組合せ最適化手法とを組み合わせることで、電力用コンデンサ等の調相設備の最適な設置箇所を自動的に決定することができ、業務の自動化、効率化を図ることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施形態が適用される配電システムのネッ

トワークモデルを示す図である。

【図2】各ストリング位置における数値とその意味を示す図である。

【図3】GAによる定式化処理の概略を示すフローチャートである。

【図4】シミュレーテッドアニーリングによる解空間の探索概念を示す図である。

【図5】タブーリストの概念の一例を示す図である。

【図6】タブーサーチによる定式化処理の概略を示すフ

ローチャートである。

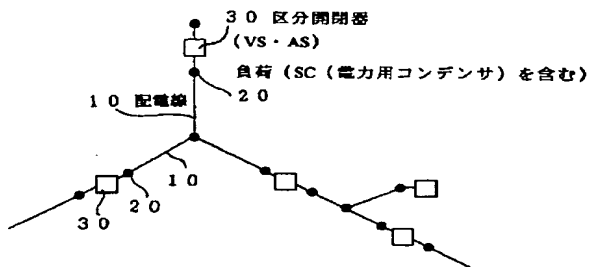
【図7】リアクティブタブーサーチによる定式化処理の概略を示すフローチャートである。

【図8】シミュレーションに用いた系統モデルの説明図である。

【符号の説明】

- 1 0 配電線
- 2 0 負荷
- 3 0 区分開閉器

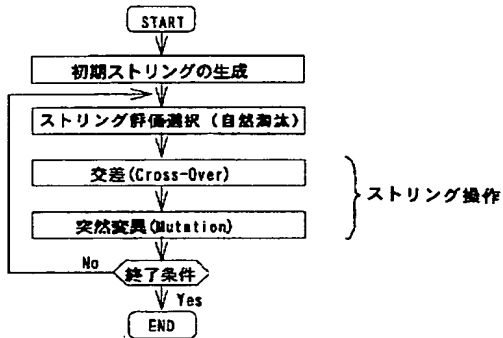
【図1】



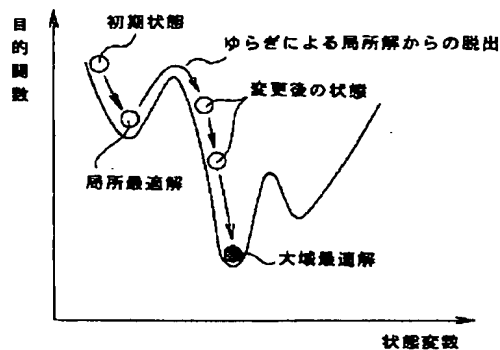
【図2】

値	意味
0	調相設備を設置しない
1	A KVAの設備を設置
2	B KVAの設備を設置
3	C KVAの設備を設置

【図3】



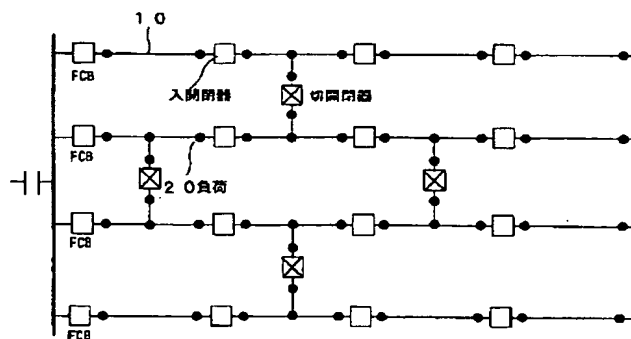
【図4】



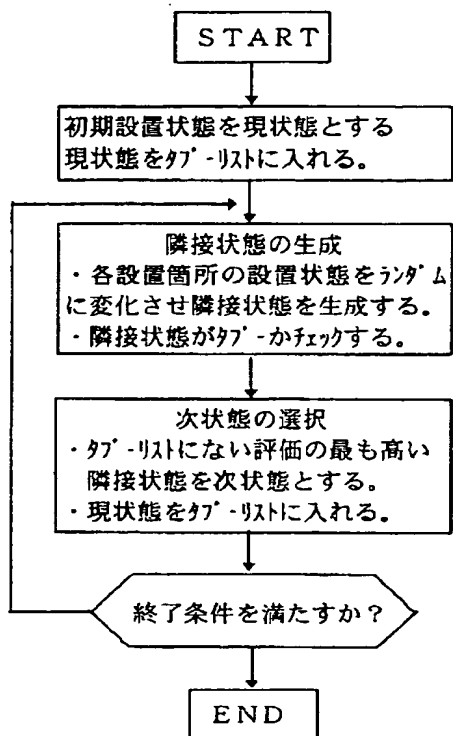
【図5】

設置状態				タブーとなった探索回数	評価値
0	1	2	...		
0	1	2	...	11	10回目
2	1	4	...	11	15回目
2	3	6	...	11	12回目

【図8】



【図 6】



【図 7】

